

# 물참나무 板材두께와 乾燥스케줄별 乾燥 速度, 應力 과 缺陷에 關한 研究\*<sup>1</sup>

李相正\*<sup>2</sup>·鄭希錫\*<sup>2</sup>

## Studies on drying rate, stress and defect with board thicknesses and drying schedules of *Quercus grosseserrata* B1. \*<sup>1</sup>

Sang Jung Lee\*<sup>2</sup>·Hee Suk Jung\*<sup>2</sup>

### SUMMARY

This research was carried out to offer the basis data for development of optimum drying schedule for a domestic oak species (*Quercus grosseserrata* B1.) by investigating drying rate, stress, defect, and moisture gradient with board thicknesses and drying schedules (code number T4-C2 and T3-B1).

The results were obtained as follows:

1. Average drying rate and total drying time from 52.2% to 5.8% were 0.105%/hr. and 486 hours for drying schedule T4-C2 and those from 62.1% to 8.3% were 0.070%/hr. and 811 hours for drying schedule T3-B1.

2. Drying rates for 28mm- and 31mm-thick boards showed similar tendency, but were significantly different from 25mm- thick board in drying schedule T4-C2 and those for 22mm-, 25mm-, 28mm-, and 31mm-thick boards showed similar tendency but were significantly different from 19mm- thick boards in drying schedule T3-B1.

3. The moisture gradients for drying schedule T4-C2 were steeper than those for drying schedule T3-B1 during drying period, and especially in early drying stage slow slope of moisture gradients of drying schedule T3-B1 was effective in preventing serious problem of surface checks.

4. Drying stresses were lower in drying schedule T3-B1 than in drying schedule T4-C2 during drying period.

5. Drying schedule T4-C2 was appropriate for 25mm-thick board but not for 28mm- and 31mm-thick board because of strong drying condition. Drying schedule T3-B1 was appropriate for 28mm- and 31mm-thick board but not for 19mm-, 22mm-, and 25mm-thick board because of weak drying condition.

Key words: drying time, drying rate, moisture gradient, drying stress, surface check

\*1. 接受 1990年 2月 2日 Received February 2, 1990

\*2. 서울대학교 農科大學 College of Agriculture, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

## 1. 緒 論

木材乾燥방법중 가장 널리 통용되고 있는 熱氣乾燥의 적정乾燥스케줄을 적용하면 건조시간의 단축과 에너지절감, 건조손실의 감소 등 木材加工産業에 있어서 생산비의 절감, 木製品의 품질향상 및 수출경쟁력 提高에 기여할 수 있다.

木材資源은 점차 감소되고 있는 추세이며 原木 輸出國의 資源保護政策으로 인하여 導入木材의 안정적 공급이 차츰 어려워지므로 國產材의 가공·이용의 필요성이 더 고조되고 있다. 國產材의 합리적 이용에는 切削性, 乾燥性, 接着과 塗裝性이 究明되는 것이 先決課題이다. 그러나 國產材의 乾燥스케줄은 제대로 개발되어 있지 않고 있으며, 외국에서 개발된 스케줄을 그대로 적용하고 있기 때문에 가끔 건조시간이 지연되거나 건조결합이 심하게 발생하는 등 문제점이 제기되고 있으므로, 國產 수종별 적정乾燥스케줄의 개발이 시급히 요청되고 있다. 그러나 목재의 적정한 乾燥스케줄은 만드는 시간과 노력이 요구되면서 試行錯誤에 의해 개발되어진다.

乾燥스케줄은 수종과 목재두께별로 다르고 동일 수종일지라도 產地에 따라 건조특성이 다를 수 있다. 따라서 乾燥스케줄은 건조특성에 맞추어서 만들어져야 한다. 더욱이 목재품이 多樣化되어 수많은 치수의 乾燥材가 요구되고 있는 실정이므로 乾燥能率을 높이기 위해서 건조특성이 유사한 수종 또는 두께를 混合·棧積하는 것이 필요하다. 최근 건조특성이 유사한 수종을 동시에 건조하는 混合乾燥에 관한 관심이 커지고 있다.

本 研究는 대표적 건조곤란수종인 참나무류 중 물참나무의 乾燥特性을 파악하고 적정 乾燥스케줄에 접근하고자 몇가지 판재 두께를 混合棧積한 후 스케줄 T4-C2와 보다 약한 乾燥스케줄인 T3-B1을 적용하여 판재의 乾燥速度, 含水率分布, 乾燥應力 및 乾燥缺陷 등을 조사함으로써 두 종류 스케줄의 적용시 가능한 두

께를 파악하고 스케줄 改良의 基礎資料를 얻고자 실시하였다.

## 2. 研究史

목재 두께와 乾燥스케줄에 관한 연구로서 Cech등(1974)은 1-인치 red oak 판재의 스케줄을 改良하기 위해서 慣行, 緩慢·促進과 緩慢스케줄을 적용한 결과 건조결합이 적고 건조가 지연되지 않는 緩慢·促進스케줄이 적당하다고 보고하였고, Simpson등(1980)은 red oak 판재의 두께변이가 건조시간에 미치는 영향을 알고자 스케줄 T4-D2를 사용하여 初期含水率 80%에서 最種含水率 7%까지 판재두께 4/4-, 5/4-와 6/4-인치의 총건조시간은 각각 18.6일, 25.9일, 33.0일로서 4/4-인치 두께에 대해 2/32-인치의 두께변이는 10~15%의 건조시간 변이를 나타냈다고 보고하였다. Alexiou등(1987)은 *Eucalyptus pilularis* Sm. 각재의 건조특성을 조사하여 건조속도 촉진의 기초자료를 제공하였고, Tschernitz등(1979)은 온도, 상대습도, 두께를 이용하여 分析法 방법으로 건조속도를 구하였으며, Ward등(1983, 1987)은 박테리아 感染 참나무재는 정상재보다 건조결합 발생이 심하여 약한 건조조건이 필요하며, 특히 乾燥初期에 pre-drying과 같은 약한 건조조건을 적용한 후 末期에 강한 건조조건을 적용하는 것이 적절하다고 보고하였다.

乾燥應力과 水分傾斜에 관한 연구로서 Harris등(1984)은 스케줄 T4-D2를 사용하여 2-인치 red oak 각재를 건조한 결과 최대 水分傾斜는 함수율 32%에서 발생하였으며, 表面割裂 발생이 많은 초기 1/3의 건조기간에서 表層에 引張應力이 작용하였다고 보고하였고, James등(1984)은 southern pine의 건조온도 상승은 水分傾斜를 크게 하였다고 보고하였다. Kawai등(1979)은 함수율분포, 수축율과 목재의 기계적 특성등을 기초로 유한요소법을 적용하여 건조중 건조응력 측정을 모델화하였다. Youngs등(1959)은 횡단면에서 内部應力을 측정하였

으나 不正確性 때문에 이용에는 문제가 있었으며, Kawai등(1978)은 건조중 건조응력은 應力轉換 경향을 나타냈고 應力 크기는 상대습도에 따라 크게 좌우되며, 초기단계의 水分傾斜는 건조응력 발생에 가장 중요한 역할을 한다고 보고하였다. Leney(1964)는 건조말기 단계에서 應力轉換이 일어난 후 表面硬化應力이 발생하여 表層에 壓縮應力이 작용하여 皸裂 발생이 억제된다고 보고하였으며, Rietz(1969)는 초기단계의 높은 온도는 건조를 촉진시키지만 皸裂과 捲어짐이 많이 발생하여 경제적으로 도움이 못된다고 보고하였다.

乾燥速度의 증가에 관한 연구로써 Simpson(1976)은 乾燥前에 85℃에서 4시간의 蒸氣처리하는 northern red oak 각재에서 15%의 건조시간의 단축 효과를 나타내었으며, Cech(1971)는 yellow birch 판재에 압축처리한 결과 방사방향 熱傳導度를 증가시켜 건조속도가 증가하였고, 두께의 7~8.5%의 變形이 가장 적절하였다고 보고하였다. Cech등(1974)은 1-인치 red oak 판재의 전평삭(presurfacing)처리하는 건조일수가 6% 감소하였다고 보고하였다.

### 3. 材料 및 方法

#### 3.1. 供試材料 및 器機

##### 3.1.1. 供試原木

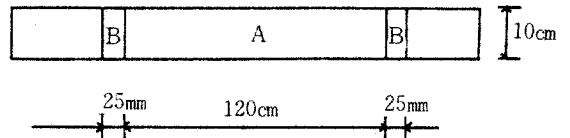
本 研究의 供試原木은 末口直徑이 18cm이고, 村長 180cm인 물참나무(*Quercus grosseserrata* B1.)原木을 사용하였다.

##### 3.1.2. 供試板材

모든 供試板材의 폭은 10cm이고, 길이는 120cm이며, 판재두께는 乾燥스케줄 T4-C2용 경우는 판재두께 25mm, 28mm와 31mm이고, 스케줄 T3-B1용 경우는 판재두께 25mm, 28mm와 31mm이고, 스케줄 T3-B1용 경우는 판재두께 19mm, 22mm, 25mm, 28mm와 31mm로서 心材를 많이 포함하는 판재를 선정하여 사용하였다.

##### 3.1.3. 初期含水率과 乾燥試驗片

供試板材로부터 그림 1과 같은 방법으로 初期含水率과 乾燥試驗片을 切取하였다. 건조시험편은 採取 즉시 양 횡단면을 은분페이트로 2회 엔드코팅하였다. 건조시험편의 심재율과 평균연륜폭은 初期含水率 試驗片에서 測定하였고, 두께별 건조시험편의 수량, 생재비중, 초기함수율, 심재율과 평균 연륜폭은 다음 표1과 같다.



A: Drying specimen

B: Moisture section

Fig 1. Method of cutting drying specimen and moisture sections

#### 3.1.4. 實驗器機

##### 3.1.4.1. 熱氣乾燥室

實驗에 사용한 熱氣乾燥室(dry kiln)의 내부 크기는 폭 129cm, 깊이 120cm, 높이 64cm 크기인 캐비네트형 乾燥室로서 건구온도와 습구온도의 설정온도를  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 로 유지할 수 있고, 風速은 초당 1m를 적용하였다.

##### 3.1.4.2. 其他器機

1) 乾燥器: 含水率 試驗片의 건조는 溫度  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지하는 오븐(oven)을 사용하였다.

2) 直示天秤: 含水率 試驗片과 生材比重 試驗片의 무게측정은 精密度 0.01g인 직시천칭을 사용하였고, 乾燥試驗片의 무게측정은 精密度 1g인 직시천칭을 사용하였다.

3) 버니어 캘리퍼스: 乾燥試驗片의 두께, 폭과 건조응력 측정에는 精密度 0.05mm인 버니어 캘리퍼스를 사용하였다.

#### 3.2. 實驗方法

##### 3.2.1. 棧積

공시판재의 棧積은 두께 2cm와 폭 3cm인 棧

Table 1. Number, green volume specific gravity, initial moisture content, heartwood percentage, and average ring width of drying specimens of *Quercus grosseserrata* Bl.

| Kiln Schedule Code number | Thickness (mm) | Number | Sp.Gr         | Initial M.C.(%) | Heartwood percentage (%) | Average ring width(mm) |
|---------------------------|----------------|--------|---------------|-----------------|--------------------------|------------------------|
| T4-C2                     | 25             | 13     | 0.66<br>±0.07 | 50.8<br>±5.83   | 51.5<br>±29.18           | 4.9<br>±1.51           |
|                           | 28             | 19     | 0.67<br>±0.01 | 54.6<br>±5.87   | 61.8<br>±18.35           | 4.6<br>±1.21           |
|                           | 31             | 14     | 0.66<br>±0.03 | 51.1<br>±4.49   | 69.8<br>±16.66           | 3.5<br>±0.95           |
| T3-B1                     | 19             | 12     | 0.67<br>±0.02 | 66.6<br>±6.37   | 77.1<br>±8.38            | 3.1<br>±0.55           |
|                           | 22             | 12     | 0.66<br>±0.03 | 64.5<br>±3.19   | 80.4<br>±5.82            | 3.2<br>±0.59           |
|                           | 25             | 12     | 0.68<br>±0.02 | 60.4<br>±7.77   | 83.8<br>±8.01            | 3.7<br>±0.56           |
|                           | 28             | 12     | 0.68<br>±0.02 | 58.9<br>±4.05   | 81.7<br>±5.77            | 3.5<br>±0.51           |
|                           | 31             | 11     | 0.69<br>±0.01 | 60.0<br>±5.42   | 87.7<br>±4.10            | 3.3<br>±0.95           |

Note: Sp. Gr: Specific gravity based on green volume Means ± Standard deviation

목을 이용하여 側面이 밀착되도록 縱積하되 같은 두께의 판재가 동일 층에 놓이도록 하였으며, 乾燥스케줄 T4-C2의 경우는 판재두께 25mm, 28mm와 31mm를 混積하였고, T3-B1의 경우는 두께 19mm, 22mm, 25mm, 28mm와 31mm를 混積하였다.

### 3.2.2. 乾燥스케줄

本研究에서 사용한 乾燥스케줄은 日本 林業試驗場(1982)이 추천한 日本産 물참나무 25mm 판재용 코드번호 T4-C2스케줄과 美國 林産研究所(1988)가 개발한 California black oak 25mm 판재용 코드번호 T3-B1스케줄을 적용하여 시험하였다. 이들 건조스케줄은 표 2, 표 3과 같다.

### 3.2.3. 乾燥中 含水率과 最終含水率

乾燥試驗片의 乾燥中 含水率(current moisture content)은 初期含水率로 산출한 全乾무게와 적당한 시간 간격으로 측정된 건조시험편의 무게로써 구하여 乾燥스케줄 적용에 사용하였다. 건조시험편의 最終含水率은 乾燥終了後 纒

Table 2. Kiln schedule (T4-C2)

| M.C.<br>(%)  | D.B.T.<br>(°C) | W.B.T.<br>(°C) | R.H.<br>(%) | E.M.C.<br>(%) |
|--------------|----------------|----------------|-------------|---------------|
| above 40     | 43.5           | 41.0           | 87          | 17.6          |
| 40~35        | 43.5           | 40.5           | 84          | 16.3          |
| 35~30        | 43.5           | 39.0           | 76          | 13.6          |
| 30~25        | 49.0           | 41.0           | 62          | 9.9           |
| 25~20        | 54.5           | 37.5           | 35          | 5.7           |
| 20~15        | 60.0           | 32.0           | 15          | 2.9           |
| below 15     | 82.0           | 54.5           | 26          | 3.5           |
| Equalizing   | 82.0           | 63.0           | 42          | 5.0           |
| Conditioning | 82.0           | 76.0           | 78          | 11.0          |

단면에서 45cm 되는 부위에서 함수율 시험편을 採取하여 全乾法으로 구하였으며, 最終含水率로 산출한 전건무게를 이용하여 乾燥曲線, 乾燥速度와 含水率分布를 구하였다.

### 3.2.4. 含水率分布와 乾燥應力

건조중 함수율 범위 중에서 高함수율, 中間 함수율과 低함수율 수준으로 건조시험편 3개씩을 판재두께별로 선정하여, 건조중 함수율분포와 건조응력의 측정은 T4-C2 스케줄로 건

Table 3. Kiln schedule (T3-B1)

| M.C.<br>(%)  | D.B.T.<br>(°C) | W.B.T.<br>(°C) | R.H.<br>(%) | E.M.C.<br>(%) |
|--------------|----------------|----------------|-------------|---------------|
| above 35     | 43.5           | 41.5           | 90          | 19.1          |
| 35~30        | 43.5           | 41.0           | 87          | 17.6          |
| 30~25        | 49.0           | 45.5           | 83          | 15.5          |
| 25~20        | 54.5           | 49.0           | 74          | 12.2          |
| 20~15        | 60.0           | 46.0           | 46          | 6.8           |
| below 15     | 71.0           | 43.5           | 21          | 3.4           |
| Equalizing   | 71.0           | 55.0           | 45          | 6.0           |
| Conditioning | 71.0           | 66.5           | 78          | 12.0          |

조한 경우에는 두께 25mm 판재의 평균함수율 45%, 35%, 30%, 25%, 15%와 乾燥末期에서 그리고 T3-B1 스케줄로 건조한 경우는 두께 25mm 판재의 평균함수율 35%, 30%, 25%, 20%, 15%와 乾燥末期에서 그림 2와 같은 방법으로 건조응력 시험편과 함수율분포 시험편을 採取하여 含水率分布와 乾燥應力을 측정하였다.

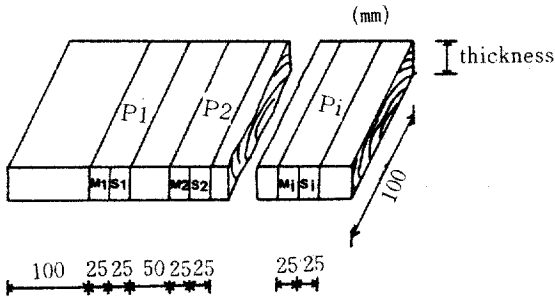


Fig 2. Method of cutting and making moisture distribution (M) and drying stress (S).

Pi: Specimens for ith drying stage.

함수율분포 시험편은 두께 방향으로 5개의 슬라이스(slice)를 만들었고, 각 슬라이스는 제작 즉시 알루미늄 호일로 密封하여 함수율분포를 조사하였다. 건조시험편의 절단면은 빨리 건조되는 것을 막기 위해 자른 즉시 횡단면을 엔드코팅(end coating)하였다.

乾燥應力은 프롱법(prong test)에 의해 측정하였다.

3.2.5. 乾燥缺陷

건조중 건조시험편의 무게를 측정할 때마다

表面割裂과 横斷面割裂의 발생 與否와 발생 板材數를 조사하였고, 각 할렬의 最初와 最大 발생시기를 측정하였다. 그리고 건조종료후 할렬의 갯수와 최대길이를 조사하여 건조결합의 정도를 闊葉樹板材의 製材規格에 準하여 구분하였다.

4. 結果 및 考察

4.1. 乾燥曲線

4.1.1. T4-C2 스케줄을 적용한 乾燥曲線 및 最終含水率

乾燥스케줄 T4-C2를 적용한 두께 25mm, 28mm와 31mm 판재의 건조곡선은 그림 3과 같으며, 얇은 판재의 기울기는 두꺼운 판재의 것보다 컸었다.

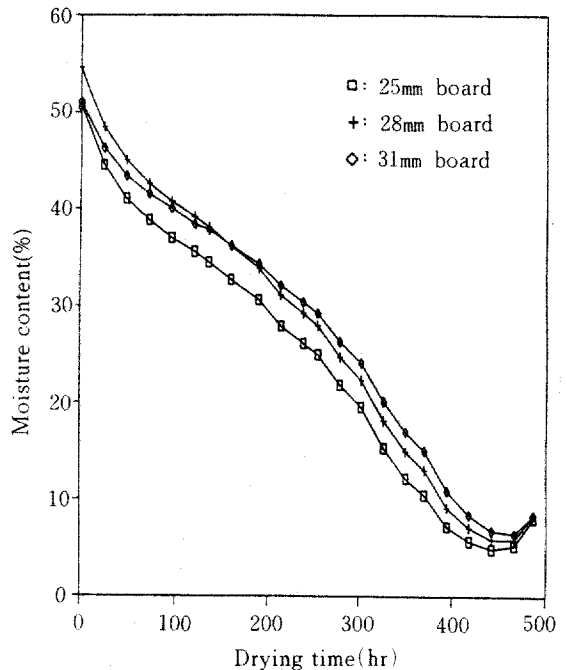


Fig 3. Kiln-drying moisture content during drying of *Quercus grosseserrata* B1. using T4-C2.

乾燥末期까지 442시간 동안 건조한 결과 初期含水率 50.8%인 두께 25mm 판재는 末期含水率 4.8%였고, 初期含水率 54.6%인 28mm 판재는 末期含水率 5.8%였으며, 初期含水率

51.1%인 31mm 판재는 末期含水率이 6.7%까지 건조되었다.

건조후처리로서 24시간 동안 이쿼라이징 처리한 결과 25mm 판재의 함수율은 5.2%였고 28mm 판재의 함수율은 5.8%였으며, 31mm 판재의 함수율은 6.4%로서 이쿼라이징처리에 의해 25mm 판재의 함수율은 증가하였으나, 28mm 판재의 함수율은 동일하였고 31mm 판재의 함수율은 감소하였다. 또한 20시간동안 콘디숀닝 처리한 결과 25mm 판재의 함수율은 8.0%였고 28mm 판재의 함수율은 8.4%였으며, 31mm 판재의 함수율은 8.4%로서 콘디숀닝처리에 의해 모든 두께의 함수율은 증가하였다.

#### 4.1.2. T3-B1 스케줄을 적용한 乾燥曲線 및 最終含水率

乾燥스케줄 T3-B1을 적용한 두께 19mm, 22mm, 25mm, 28mm와 31mm 판재의 건조곡선은 그림 4와 같으며, 19mm 판재를 제외한 22mm, 25mm, 28mm와 31mm 판재의 건조곡선의 기울기는 類似하였다.

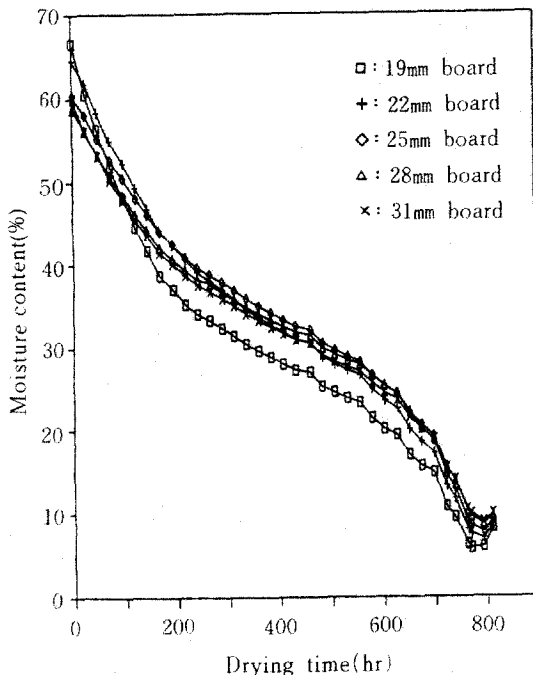


Fig 4. Kiln-drying moisture content during drying of *Quercus grosseserrata* B1. using T3-B1.

건조말기까지 769시간 동안 건조한 결과 初期含水率 66.6%인 두께 19mm 판재의 末期含水率이 5.8%, 初期含水率 64.5%인 22mm 판재의 末期含水率이 7.5%, 初期含水率 60.4%인 25mm 판재의 末期含水率이 8.5%, 初期含水率 58.9%인 28mm 판재의 末期含水率이 9.7%, 初期含水率 60.0%인 31mm 판재의 末期含水率이 10.0%까지 건조되었다.

건조후처리로서 24시간 동안 이쿼라이징처리한 결과 19mm 판재의 함수율은 6.0%, 22mm 판재의 함수율은 7.0%, 25mm 판재의 함수율은 7.7%, 28mm 판재의 함수율은 8.7%, 31mm 판재의 함수율은 9.0%로서 19mm 판재의 함수율은 증가하였으나 22mm, 25mm, 28mm와 31mm 판재의 함수율은 감소하였다. 또한 18시간 동안 콘디숀닝처리한 결과 19mm 판재의 함수율은 8.3%, 22mm 판재의 함수율은 8.7%, 25mm 판재의 함수율은 9.2%, 28mm 판재의 함수율은 9.8%와 31mm 판재의 함수율은 10.1%로서 콘디숀닝처리에 의해 모든 두께의 함수율은 증가하였다.

## 4.2. 乾燥速度

### 4.2.1. T4-C2 스케줄을 적용한 乾燥速度

판재의 두께와 乾燥中 含水率 단계별 乾燥速度는 그림 5와 같다.

함수율 35%까지 판재두께별 건조속도의 경우 25mm 판재는 0.127%/hr. 이고 28mm 판재는 0.109%/hr. 이며, 31mm 판재는 0.093%/hr. 로서 두께가 얇을수록 건조속도는 컸었다. 함수율 25%에서 20%까지 건조속도의 경우 25mm 판재는 0.071%/hr. 이고 28mm 판재는 0.098%/hr. 이며, 31mm 판재는 0.074%/hr. 로서 28mm 판재의 건조속도가 가장 컸으며 25mm 판재의 건조속도가 가장 적었다.

함수율 30%에서 25%까지 건조속도의 경우 25mm 판재는 0.089%/hr. 이고 28mm 판재는 0.115%/hr. 이며, 31mm 판재는 0.105%/hr. 였다. 함수율 25%에서 20%까지 건조속도의 경

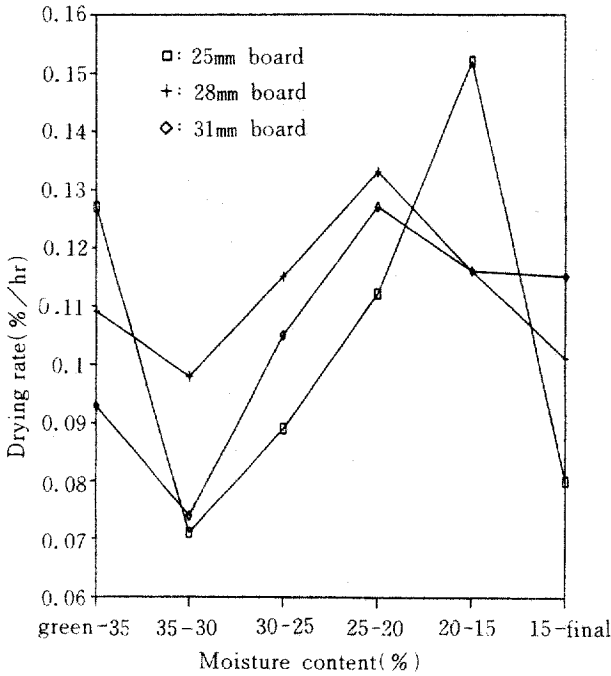


Fig 5. Drying rate during drying using T4-C2.

우 25mm 판재는 0.112%/hr. 이고 28mm 판재는 0.133%/hr. 이며, 31mm 판재는 0.127%/hr. 였다. 함수율 20%에서 15%까지 건조속도의 경우 25mm 판재는 0.152%/hr. 이고 28mm 판재는 0.116%/hr. 이며, 31mm 판재는 0.116%/hr. 로서 25mm 판재의 건조속도가 가장 컸었고 28mm와 31mm 판재의 건조속도는 동일하였다. 함수율 15%에서 乾燥末期까지 건조속도의 경우 25mm 판재는 0.080%/hr. 이고 28mm 판재는 0.101%/hr. 이며, 31mm 판재는 0.115%/hr. 로서 31mm 판재의 건조속도가 가장 컸었고 25mm 판재의 건조속도가 가장 적었다.

25mm 판재의 건조속도는 두꺼운 판재에 비해 건조초기에 컸었으나 건조말기에는 적었다. 그리고 전 건조기간중에서 모든 두께의 건조속도는 함수율 35%에서 30% 중에서 가장 적었고, 두께 25mm 판재는 함수율 20%에서 15%사이에서 가장 컸었으나 두께 28mm와 31mm 판재는 함수율 25%에서 20% 사이에서 가장 컸었다. 이와같이 25mm 판재의 最大 乾燥速度가 28mm와 31mm 판재에 비해 차이가 있는 것은 25mm 판재의 함수율은 다른 두께의 판재에 비해 일찍 떨어졌으나 함수율 단계별로 표시되었기 때문이라 생각된다. 그리고 전 건조기간의 평균 건조속도는 0.105%/hr. 로 Cech등(1074)이 보고한 1-인치 red oak 판재에 mild-schedule을 적용한 경우의 0.146%/hr. 보다 느렸으며, Simpson등(1980)이 5/4-인치 red oak 판재에 T4-D2 스케줄을 적용한 경우의 0.117%/hr. 보다 약간 느렸다.

어졌으나 함수율 단계별로 표시되었기 때문이라 생각된다. 그리고 전 건조기간의 평균 건조속도는 0.105%/hr. 로 Cech등(1074)이 보고한 1-인치 red oak 판재에 mild-schedule을 적용한 경우의 0.146%/hr. 보다 느렸으며, Simpson등(1980)이 5/4-인치 red oak 판재에 T4-D2 스케줄을 적용한 경우의 0.117%/hr. 보다 약간 느렸다.

4.2.2. T3-B1 스케줄을 적용한 乾燥速度

판재의 두께와 건조중 함수율 단계별 乾燥速度는 그림 6과 같다. 전 전고기간의 평균 건조속도는 0.070%/hr. 로 T4-C2 스케줄을 적용한 경우의 2/3 정도였다.

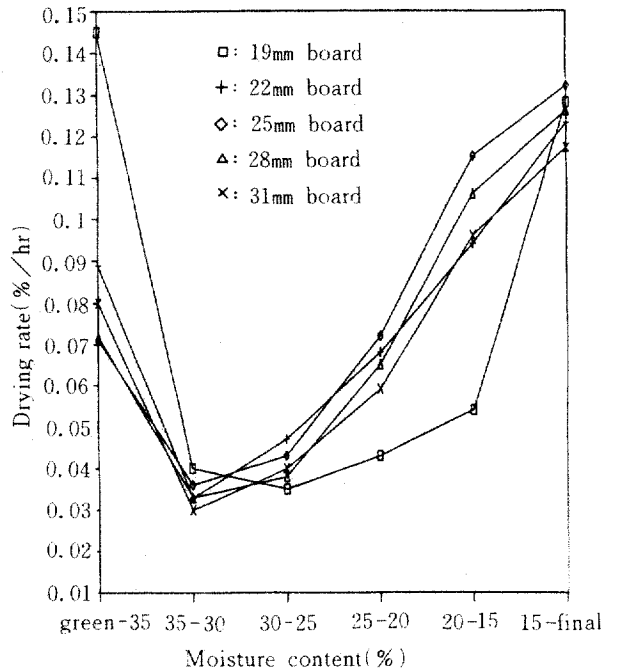


Fig 6. Drying rate during drying using T3-B1.

함수율 35%까지 판재두께별 건조속도의 경우 19mm 판재는 0.145%/hr., 22mm 판재는 0.089%/hr., 25mm 판재는 0.071%/hr., 28mm 판재는 0.072%/hr. 와 31mm 판재는 0.080%/hr. 로서 19mm 판재의 건조속도가 가장 컸었다. 함수율 35%에서 30%까지 건조속도의 경우 19mm 판재는 0.040%/hr., 22mm 판재는 0.033%/hr., 25mm 판재는 0.036%/hr., 28mm 판재는 0.033%/hr. 와 31mm 판재는 0.030%/hr.

hr.였다. 함수율 30%에서 25%까지 건조속도의 경우 19mm 판재는 0.035%/hr., 22mm 판재는 0.047%/hr., 25mm 판재는 0.043%/hr., 28mm 판재는 0.038%/hr.와 31mm 판재는 0.040%/hr.로서 22mm 판재의 건조속도가 가장 컸었다. 함수율 25%에서 20%까지 건조속도의 경우 19mm 판재는 0.043%/hr., 22mm 판재는 0.068%/hr., 25mm 판재는 0.072%/hr., 28mm 판재는 0.065%/hr.와 31mm 판재는 0.059%/hr.로 25mm 판재의 건조속도가 가장 컸었다. 함수율 20%에서 15%까지 건조속도의 경우 19mm 판재는 0.054%/hr., 22mm 판재는 0.094%/hr., 25mm 판재는 0.115%/hr., 28mm 판재는 0.105%/hr.와 31mm 판재는 0.096%/hr.로서 25mm 판재의 건조속도가 가장 컸었다. 함수율 15%에서 乾燥末期까지 건조속도의 경우 19mm 판재는 0.128%/hr., 22mm 판재는 0.123%/hr., 25mm 판재는 0.132%/hr., 28mm 판재는 0.126%/hr.와 31mm 판재는 0.117%/hr.로서 25mm 판재의 건조속도가 가장 컸었다.

22mm, 25mm, 28mm와 31mm 판재의 건조속도는 유사한 경향을 나타내었으나 19mm 판재는 乾燥初期와 乾燥中期에 뚜렷한 차이를 나타내었다. 그리고 전 건조기간중 19mm 판재의 건조속도는 함수율 30%에서 25% 중에서 가장 적었으나 두께 22mm, 25mm, 28mm와 31mm 판재는 35%에서 30% 사이에서 가장 적었다. 모든 두께의 판재는 함수율 15%에서 건조말기 사이에서 가장 큰 건조속도를 나타내었다.

### 4.3. 含水率分布

#### 4.3.1. T4-C2 스케줄을 적용한 含水率分布

T4-C2 스케줄을 적용한 乾燥中 평균함수율 41.0%, 33.0%, 28.5%, 22.0%, 14.7%와 5.8%에서의 含水率分布는 그림 7과 같다.

함수율 41.0% 수준에서 세 두께 모두 表層과 中間層간의 함수율은 큰 차이를 나타내었으나 內層과 中間層의 함수율은 비슷하였다. 이

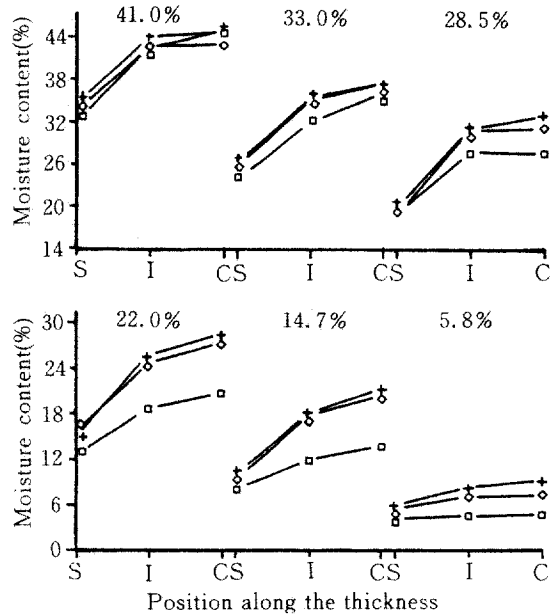


Fig 7. Moisture gradient during drying using □:25mm +:28mm ○:31mm  
S: shell I: intermediate C: core

와같이 건조초기에서 표층과 중간층간의 급격한 水分傾斜는 表面割裂 발생의 위험성이 있다. 함수율 33.0% 수준에서 두께 25mm 판재의 中間層과 內層의 水分傾斜는 두꺼운 판재보다 급격하였으나 28mm와 31mm 판재간에는 비슷하였다. 함수율 28.5%수준에서 25mm 판재의 表層과 中間層의 水分傾斜는 두꺼운 판재의 것보다 緩慢하였으나 28mm와 31mm 판재간에는 비슷하였다. 함수율 22.0%와 14.7% 수준에서 25mm 판재의 표층과 중간층간의 水分傾斜는 28mm와 31mm 판재의 것보다 緩慢하였다. 함수율 5.8%수준에서의 水分傾斜는 세 두께 모두 매우 緩慢하였다. 건조시간이 경과함에 따라 세 두께 모두 水分傾斜가 점차 緩慢하게 되었으며 전 건조기간 동안 28mm와 31mm 판재의 水分傾斜는 유사한 경향을 나타내었다.

#### 4.3.2. T3-B1 스케줄을 적용한 含水率分布

T3-B1 스케줄을 적용한 乾燥中 평균함수율 30.4%, 26.7%, 22.9%, 17.8%, 12.5%와 8.3%에서의 含水率分布는 그림 8과 같다. 함수율 30.4% 수준에서 19mm 판재의 水分傾斜는 두꺼운 판재의 것보다 매우 緩慢하였다. 함수



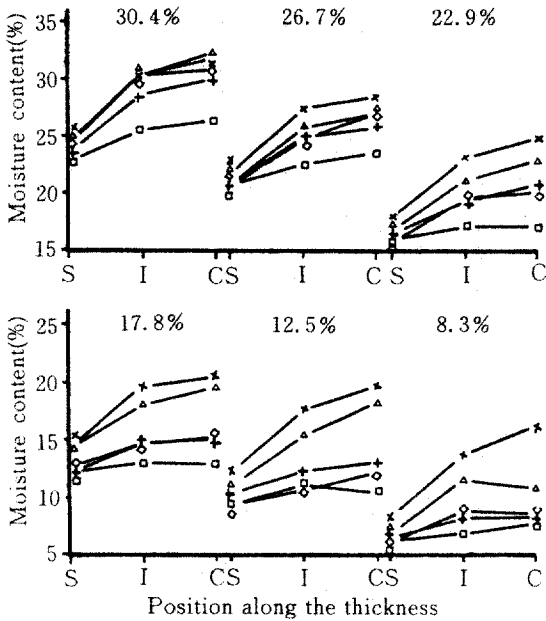


Fig 8. Moisture gradient during drying using T3-B1.

□:19mm +:22mm ◊:25mm △:28mm ×:31mm

S: shell I: intermediate C: core

을 26.7% 수준에서 28mm 판재의 中間層과 內層간의 水分傾斜는 다른 두께의 것보다 급격하였다. 含水율 22.9% 수준에서 22mm 판재의 表層과 中間層간의 水分傾斜는 25mm, 28mm와 31mm 판재의 것보다 緩慢하게 되었다. 含水율 28mm와 31mm 판재의 水分傾斜는 28mm와 31mm 판재의 것보다 緩慢하였다. 含水율 8.3% 수준에서 31mm 판재의 中間層과 內層간의 水分傾斜는 다른 두께의 것보다 급격하였다. 19mm 판재의 水分傾斜는 含水율 22.9% 수준까지 다른 두께의 것보다 매우 緩慢하였으며, 含水율 17.8% 이후의 수준에서는 22mm와 25mm 판재의 경우와 유사하였으나 28mm와 31mm 판재의 것보다 緩慢하였다.

전 건조기간의 층별 水分傾斜는 스케줄 T4-C2보다 적었으며 특히 건조초기의 水分傾斜緩和는 Kawai 등(1984)이 보고한 건조결함 발생에 가장 크게 영향을 미치는 건조초기에 Harris 등(1984)가 보고한 바와 같이 초기 1/3의 건조시간동안 표층에 발생하는 인장응력을 緩和시켜서 초기 건조결함 발생 억제에 적절하다고

생각한다.

#### 4.4. 乾燥應力

##### 4.4.1. T4-C2 스케줄을 적용한 乾燥應力

모든 두께의 乾燥中 含水율별 乾燥應力을 측정된 결과는 그림 9와 같으며, 건조중 含水율 41.0% 수준에서는 逆表面硬化率 20% 정도를 나타내었고 건조시간의 경과에 따른 건조응력의 변화는 건조초기 含水율 28.5% 수준까지는 역표면경화응력을 나타냈으며, 그 이후 건조중기에 表面硬化應力이 나타나기 시작하여 乾燥末期까지 증가하는 경향을 나타냈다. 이퀄라이징처리에 의해 표면경화응력은 감소하였고 콘디숀닝처리에 의해서 역표면경화응력으로 전환되었다. 두께간의 건조응력은 두께가 얇은 판재일수록 應力轉換이 빨랐고 표면경화응력률도 컸었으나 이퀄라이징처리에 의해 표면경화율의 감소정도는 두께가 얇을수록 컸었으나 콘디숀닝처리에 의해 표면경화율의 감소정도는 서로 비슷하였다.

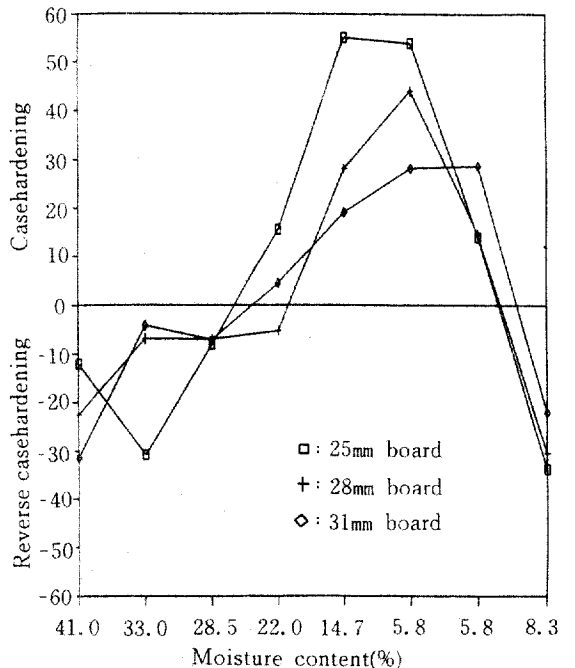


Fig 9. Casehardening stress during drying using T4-C2.

건조속도의 증가는 Leney(1964)가 보고한 바와 같이 응력전환이 발생한 건조말기 표층은 壓縮應力이 작용하여 할렬발생 위험이 적기 때문에 응력전환이 발생한 함수율 25% 이후에서 乾燥速度를 증가하는 것이 적절하다고 생각한다.

4.4.2. T3-B1 스케줄을 적용한 乾燥應力

모든 두께의 乾燥中 함수율별 乾燥應力의 변화는 그림 10과 같으며, 응력의 크기는 전 건조기간동안 T4-C2 스케줄을 적용한 경우보다 적었다.

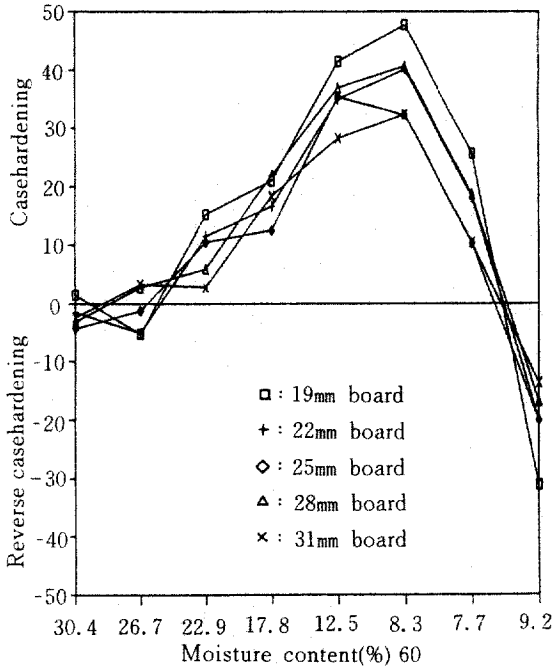


Fig 10. Casehardening stress during drying using T3-B1.

건조시간의 경과에 따른 건조응력의 변화는 건조초기 함수율 30.4% 수준에서는 19mm 판재는 표면경화응력, 22mm, 25mm, 28mm와 31mm 판재는 역표면경화응력을 나타내었으며, 함수율 26.7% 수준에서는 19mm, 22mm와 25mm 판재는 역표면경화응력, 28mm와 31mm 판재는 표면경화응력을 나타내었다. 그 이후 표면경화응력이 건조말기까지 증가하는 경향을 나타냈다. 두께간의 건조응력은 T4-C2 스케줄을 적용한 경우보다 차이가 적었고 건조초기에 판재두께간의 차이가 적었으나, 건조말기에 두께가 얇은

판재일수록 표면경화응력이 크게 나타났다. 應力轉換時期는 스케줄 T4-C2를 적용한 경우와 유사하였다. 그리고 건조초기의 응력이 대체로 낮아 乾燥缺陷 豫防에 적절하였다고 생각하지만 건조중기 이후의 水分傾斜가 緩慢한 두께 19mm, 22mm 및 25mm 판재의 경우 건조속도를 촉진시켜 건조시간을 단축할 수 있다고 사료되어 28mm, 31mm와 混合·棧積하여 건조하는 것은 바람직하지 않다고 생각한다.

4.5. 乾燥缺陷

4.5.1. T4-C2 스케줄을 적용한 乾燥缺陷

판재두께별 橫斷面割裂과 表面割裂의 最初 및 最大 발생시기는 표 4와 같다. 횡단면할렬은 함수율 45.0~34.7%에서 최초로 발생하여 함수율 36.0~31.9%에서 최대치에 도달하였으나, 건조말기에는 閉鎖되었다. 표면할렬은 건조시작 1일후 함수율 49.3~46.8%에서 최초로 발생하여 함수율 36.0~31.9%에서 최대치에 도달하였으며, 그 이후는 오물어 들었다. 이러한 결과는 응력전환이 이루어진 후에 할렬이 감소한다고 밝힌 Leney(1964)의 보고와 일치하였다. 두께간의 표면할렬 최초 발생시기와 함수율은 비슷하였으나, 최대치 도달시기는 두께 25mm 판재가 빨리 나타났다. 표면할렬의 최초 발생시기는 횡단면할렬의 것보다 빨랐으나, 최대치 도달시기는 서로 같았다.

乾燥木材의 橫斷面할렬과 表面할렬의 本數發生率은 표6과 같으며, 건조목재의 橫斷面할렬의 발생율은 두께가 얇을 수록 적었으나 표면할렬의 경우는 두께간에 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

4.5.2. T3-B1 스케줄을 적용한 乾燥缺陷

판재두께별 橫斷面할렬과 表面할렬의 最初 및 最大 발생시기는 표5와 같다. 횡단면할렬은 함수율 40.7~35.2%에서 최초로 발생하여 함수율 40.7~35.2%에서 최대치에 도달하였고 건조말기에는 閉鎖되었다. 표면할렬은 함수율 50.5~46.0%에서 최초로 발생하여 함수율 40.

Table 4. Drying times and moisture content at initial and maximum end checks and surface checks occurred in kiln drying for drying schedule T4-C2.

| Thickness<br>(mm) | End check              |           |                        |           | Surface check          |           |                        |           |
|-------------------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|                   | Initial                |           | Maximum                |           | Initial                |           | Maximum                |           |
|                   | drying<br>time<br>(hr) | MC<br>(%) | drying<br>time<br>(hr) | MC<br>(%) | drying<br>time<br>(hr) | MC<br>(%) | drying<br>time<br>(hr) | MC<br>(%) |
| 25                | 48                     | 43.3      | 136                    | 36.0      | 24                     | 48.0      | 136                    | 36.0      |
| 28                | 190                    | 34.7      | 214                    | 31.9      | 24                     | 48.0      | 214                    | 31.9      |
| 31                | 48                     | 45.0      | 214                    | 32.5      | 24                     | 48.0      | 214                    | 32.5      |

Table 5. Drying times and moisture content at initial and maximum end checks and surface checks occurred in kiln drying for drying schedule T3-B1.

| Thickness<br>(mm) | End check              |           |                        |           | Surface check          |           |                        |           |
|-------------------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|                   | Initial                |           | Maximum                |           | Initial                |           | Maximum                |           |
|                   | drying<br>time<br>(hr) | MC<br>(%) | drying<br>time<br>(hr) | MC<br>(%) | drying<br>time<br>(hr) | MC<br>(%) | drying<br>time<br>(hr) | MC<br>(%) |
| 19                | 216                    | 35.2      | 216                    | 35.2      | 96                     | 48.1      | 216                    | 35.2      |
| 22                | 240                    | 39.1      | 288                    | 37.0      | 120                    | 49.4      | 240                    | 39.1      |
| 25                | 240                    | 39.6      | 240                    | 39.6      | 96                     | 50.5      | 240                    | 39.6      |
| 28                | 192                    | 40.7      | 192                    | 40.7      | 120                    | 46.0      | 192                    | 40.7      |
| 31                | 264                    | 36.8      | 264                    | 36.8      | 96                     | 47.8      | 311                    | 35.0      |

Table 6. Degree of drying defects of Quercus grosseserrata B1. occurred during kiln drying using schedule T4-C2.

| Thickness<br>(mm) | End check |      |          |       | Surface check |      |          |       |
|-------------------|-----------|------|----------|-------|---------------|------|----------|-------|
|                   | 0cm       | <6cm | 6cm~12cm | 12cm< | 0cm           | <6cm | 6cm~12cm | 12cm< |
| 25                | 100       | —    | —        | —     | 70.0          | 10.0 | —        | 20.0  |
| 28                | 87.5      | 12.5 | —        | —     | 68.7          | 18.8 | 12.5     | —     |
| 31                | 91.0      | 9.0  | —        | —     | 63.4          | 9.3  | 27.3     | —     |

Table 7. Degree of drying defects of Quercus grosseserrata B1. occurred during kiln drying using schedule T3-B1.

| Thickness<br>(mm) | End check |      |          |       | Surface check |      |          |       |
|-------------------|-----------|------|----------|-------|---------------|------|----------|-------|
|                   | 0cm       | <6cm | 6cm~12cm | 12cm< | 0cm           | <6cm | 6cm~12cm | 12cm< |
| 19                | 100       | —    | —        | —     | 65.1          | 9.9  | 8.3      | 16.7  |
| 22                | 92.5      | 7.5  | —        | —     | 71.5          | 16.4 | 11.1     | —     |
| 25                | 88.8      | 11.2 | —        | —     | 70.0          | 7.8  | 11.1     | 11.1  |
| 28                | 80.5      | 19.5 | —        | —     | 78.5          | 10.4 | 11.1     | —     |
| 31                | 80.0      | 20.0 | —        | —     | 72.5          | 5.3  | 22.2     | —     |

7~35.0%에서 최대치에 도달하였으며, 그 이후는 오히려 들었다. 두께간의 표면할렬 최초 발생시기와 함수율은 비슷하였으나, 최대치 도달시기는 두께 28mm 판재가 빨리 나타났다. 횡

단면할렬은 최초로 발생한 후 곧바로 최대치에 도달하였으며, 표면할렬의 최초발생시기는 횡단면할렬의 것보다 빨랐으나 최대치 도달시기는 서로 같았다.

건조목재의 횡단면할렬과 표면할렬의 본수 발생율은 표7과 같으며, 횡단면할렬의 발생율은 두께가 두꺼울수록 많았다. 그러나 표면할렬의 발생율은 두께간에 뚜렷한 경향을 나타내지 않았으며, T4-C2 스케줄을 적용한 경우보다 적게 발생하였다.

### 5. 結 論

물참나무 (*Quercus grosseserrata* B1.) 板材의 몇 가지 두께를 混積하여 스케줄 T4-C2를 適用·乾燥한 후 스케줄 T3-B1을 適用·乾燥한 결과를 판재두께와 乾燥스케줄별 乾燥速度, 含水率分布, 乾燥應力과 乾燥缺陷을 利用하여 分析한 결론은 다음과 같다.

1. 스케줄 T4-C2를 적용하여 평균 初期含水率 52.2%에서 평균 末期含水率 5.8%까지 평균건조속도는 0.105%/hr. 였고 총건조시간은 486시간이었다. 스케줄 T3-B1을 적용하면 평균 初期含水率 62.1%에서 평균 末期含水率 8.3%까지 평균건조속도는 0.070%/hr. 였고 총건조시간은 811시간이었다.
2. 두께별 乾燥速度는 스케줄 T4-C2를 사용한 경우 28mm와 31mm 판재는 비슷한 경향이 었으나 25mm 판재는 뚜렷한 차이를 나타내었고, 스케줄 T3-B1을 사용한 경우는 22mm, 25mm, 28mm와 31mm 판재는 비슷하였으나 19mm 판재는 뚜렷한 차이를 나타내었다.
3. 스케줄 T3-B1의 水分傾斜는 전 건조기간 동안 스케줄 T4-C2보다 적었으며, 특히 건조초기의 水分傾斜緩和는 참나무 건조에서 가장 문제시되는 건조초기 表面割裂豫防에 적절하였다.
4. 스케줄 T3-B1의 전 건조기간의 應力은 스케줄 T4-C2보다 적었고 특히 건조초기應力이 緩和되었다.
5. 스케줄 T4-C2는 25mm 판재에 적절하였으나 28mm와 31mm 판재에는 강한 조건이었고 스케줄 T3-B1은 28mm와 31mm 판재에는 적절하였으나 19mm, 22mm 및 25mm 판재에 대해

서는 약한 건조조건이었다.

### 參考文獻

1. Alexiou, P. N., J. Hartley and J. F. Marchant. 1987. Drying stresses in regrowth blackbutt (*Eucalytus pilulalis* Sm.). Proceedings of the international conference on stress development and degrade during wood drying. pp. 82-94. Skelleftea, Sweden.
2. Avramidies, S. and J.F. G. 1988. Development of kiln schedules for 4-inch by 4-inch Pacific Coast hemlock. For. Prod. J. 38(9): 45-48.
3. Barnes, H. M. and F. W. Taylor. 1985. The effect of drying schedule on treatability and check formation of southern pine landscape timbers. For. Prod. J. 25(1): 57-60.
4. Beall, F. C. and G. R. Spoerke. 1973. Degrade of oak lumber as influenced by drying. For. Prod. J. 23(5): 25-30.
5. Cech, M. Y. 1971. Dynamic transverse compression treatment to improve drying behavior of yellow birch. For. Prod. J. 21(2): 41-50.
6. \_\_\_\_\_ and F. Pfaff. 1974. Kiln-drying of 1-inch red oak. For. Prod. J. 24(10): 30-37.
7. Cuppet, D. G. and E. P. Craft. 1970. Low-Temperature Drying of 4/4 appala chian red Oak. For. Prod. J. 20(6): 34-38.
8. Fell, J. D. and J. L. Hill. 1980. Sampling levels for hardwood kiln drying control. For. Prod. J. 30(8): 32-36.
9. Gaby, L. I. 1963. Surface checking of white oak as related to mechanical processing. For. Prod. J. 13(12): 529-532.
10. Harris, R. A. 1988. Dimension stability of

- red oak and eastern white pine dried by ratio - frequency / vacuum and conventional drying processes. *For. Prod. J.* 38(2): 25-26.
11. \_\_\_\_\_, M. A. Taras. 1984. Comparison of moisture content distribution, stress distribution, and shrinkage of red oak lumber dried by a radio-frequency / vacuum process and a conventional kiln. *For. Prod. J.* 34(1): 44-54.
  12. \_\_\_\_\_ and J. H. Syme. 1988. The correlation between green density and the occurrence honeycomb in kiln dried red oak rounds. *For. Prod. J.* 38(7 / 8): 64-66.
  13. Hart, C. A. and R. C. Gilmore. 1985. An air-drying technique to control surface checking in refractory hardwood. *For. Prod. J.* 35(10): 43-50.
  14. Haygreen, J. G. 1963. The significance of microshrinkage during the initial stages of drying. *For. Prod. J.* 13(2): 553-537.
  15. Kawai, S., K. Nakato and T. Sadoh. 1979. Computation of drying stresses resulting from moisture gradients in wood during drying. I. computational method. *Mokuzai Gakkaishi.* 25(2): 103-111.
  16. \_\_\_\_\_, 1979. Computation of drying stresses resulting from moisture gradients in wood during drying. II. Numerical calculation. *Mokuzai Gakkaishi.* 25(4): 272-279.
  17. Leney, L. 1964. Checking of planed and rough red oak during kiln drying. *For. Prod. J.* 14(3): 103-105.
  16. McMillen, J. M. and R. C. Baltes. 1951. New kiln schedules for presurfaced oak lumber. *For. Prod. J.* 21(6): 1926.
  20. Simpson, W. T. 1976. Steaming northern red oak to reduce kiln-drying time. *For. Prod. J.* 26(10): 35-36.
  21. \_\_\_\_\_ 1987. Vacuum drying northern red oak. *For. Prod. J.* 37(1): 35-38.
  22. \_\_\_\_\_ 1982. Warp reduction in kiln-drying hardwood dimension. *For. Prod. J.* 32(5): 29-32.
  23. \_\_\_\_\_, and J. L. Tschernitz. 1978. Time, cost, and energy consumption for drying red oak lumber as affected by thickness and thickness variation. *For. Prod. J.* 28(12): 23-28.
  24. Tschernitz, J. L. and W. T. Simpson. 1979. Drying rate of northern red oak lumber as an analytical function of temperature, relative humidity, and thickness. *Wood. Sci.* 11(4): 202-208.
  25. Trofatter, G., R. A. Harris, J. Schroeder, and M. A. Taras. 1986. Comparison of moisture content variation in red oak lumber dried by a radio-frequency / vacuum process and conventional kiln. *For. Prod. J.* 36(5): 25-28.
  26. Ward, J. C. and D. A. Groom. 1983. Bacterial oak: drying problems. *For. Prod. J.* 33(10): 57-65.
  27. \_\_\_\_\_, and W. T. Simpson. 1987. comparison of four methods for drying bacterially infected and normal thick red oak. *For. Prod. J.* 37(11 / 12): 15-22.
  28. Youngs, R. L. and B. Norris. 1959. New method calculation internal stresses in wood. *For. Prod. J.* 9(1): 367-371.
  29. Hardwood Research Council. 1988. Dry-kilnoperator's manual. USDA. (7): 17-30.
  30. 임업시험장. 1982. 木材工業 핸드북 스케. 丸喜株式會社 : 308-311.